ارائه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی کارا با استفاده از روش رشد سازگار بیولوژیکی★

سید محمدحسین جزایری ابنوی[۱] محمدحسین ابوالبشری[۲]

چکیده تاکنون روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی شکل و ساختار سازه‌های مکانیکی با الهام از رفتار طبیعت تدوین گردیده است. در این مقاله با استفاده از اصل رشد سازگار بیولوژیکی، دو الگوریتم برای بهینه‌سازی شکل و ساختار ارائه شده است. الگوریتم اول به یک صفحه‌ی سوراخ دار و نیز یک فیلت و الگوریتم دوم به یک تیر مخروطی و نیز یک تیر با سطح مقطع متفاوت اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمر خستگی صفحه‌ی سوراخ دار تا ٤٠ برابر افزایش و تنش‌های ماکزیمم فیلت نسبت به نتایج دیگر پژوهشگران ٦درصد کاهش یافته است. هم‌چنین این الگوریتم می‌تواند حجم سازه را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی بهینه‌سازی شکل، بهینه‌سازی ساختار، رشد سازگار بیولوژیکی، عمر خستگی.

Development of Robust Optimization Algorithms Based on Adaptive Biological Growth Method

S.M.H. Jazayeri M.H. Abolbashari

Abstract *Many shape and topology optimization methods have been inspired from the nature. In this paper, two different optimization algorithms based on the adaptive biological growth (ABG) have been applied to some structural elements. The first algorithm is developed for the shape optimization and is applied to a plate with a central hole as well as a fillet plate. The second algorithm is the soft kill option (SKO) that is applied to a cone cantilever beam and a beam with variable cross section where the optimum topology of them are sought. The results show that the fatigue life of the plate with a central hole is increased by 40 times. Also, the maximum normalized first principle stress is 6% lower and finally, the volume of the optimum structure is less than those obtained by other researchers.*

key Words Shape Optimization, Topology Optimization, Adaptive Biological Growth, Fatigue Life

---

★تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۹/۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۱۳ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول، استاد گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

بهینه‌سازی شکل و ساختار سازه‌های مکانیکی یکی از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده و روش‌های مختلفی برای آن ارائه شده است. روش‌های بهینه‌سازی شکل معمولاً یک ناحیه‌ی کوچک از جسم را مورد مطالعه قرار می‌دهد و عملیات بهینه‌سازی تنها روی این قسمت انجام می‌گیرد تا برای مثال ماکزیمم تنش موضعی در آن قسمت مینیمم شود.در این نوع از بهینه‌سازی هنگام شروع عملیات، ساختار جسم به طور کامل مشخص است و قسمت‌هایی از سازه مثلاً سوراخ‌ها و یا شکاف‌ها دارای تنش‌های موضعی غیر یکنواخت می‌باشند. هدف این روش‌ها پیدا کردن بهترین شکل و پروفیل برای قسمت‌های ذکر شده است تا ماکزیمم تنش به اندازه‌ی کافی کوچک شود و مرز مورد مطالعه دارای تنش یکنواخت‌تری گردد.

سه روش اصلی برای بهینه‌سازی شکل وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از: برنامه‌نویسی ریاضی[1]، روش رشد سازگار بیولوژیکی[2]و بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها [3]. روش برنامه‌نویسی ریاضی بر پایه‌ی ریاضیات استوار است و برای محاسبه‌ی شکل نهایی بهینه به محاسبه‌ی گرادیان تنش نیاز است. برای محاسبه‌ی گرادیان تنش ابتدا گرادیان تغییر مکان نسبت به متغیرهای طراحی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از روابط حاکم بر مسئله، گرادیان تنش محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه‌ی گرادیان‌ها، برای محاسبه‌ی متغیر طراحی می‌توان از هر روش ریاضی غیر خطی برای حل معادلات به دست آمده استفاده کرد. بهینه‌سازی شکل با استفاده از برنامه‌نویسی ریاضی، روش بسیار قدرتمندی است ولی دارای اشکالات اساسی است. بزرگ‌ترین اشکال این روش حجم محاسبات بالا و در نتیجه هزینه‌ی بالای این روش است. از طرفی به علت انجام عملیات ریاضی بی‌شمار برای محاسبه‌ی گرادیان‌ها و متغیرهای طراحی، دقت این روش در قیاس با روش‌های دیگر مانند روش رشد سازگار بیولوژیکی کم‌تر است [4].

از بهینه‌سازی ساختار زمانی استفاده می‌شود که هیچ محدودیتی در شکل نهایی سازه یا قطعه‌ی مکانیکی وجود ندارد و شکل قطعه تا پایان فرایند بهینه‌سازی نامشخص است. تنها اطلاعات موجود، معیار بهینه‌سازی و محدودیت‌های طراحی از قبیل نیروها و تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.هدف بهینه‌سازی ساختار حذف یا باز توزیع ماده در دامنه‌ی اولیه‌ی سازه و رسیدن به یک ساختار بهینه با توزیع تنش نسبتاً یکنواخت‌تری می‌باشد. این روش، یک روش مبتنی بر تکرار می‌باشد و معمولاً همراه با تاریخچه‌ای از ساختارهای میانی است که آن‌ها نیز در فرآیند طراحی قابل استفاده‌اند.

تاکنون چهار الگوریتم اصلی برای بهینه‌سازی ساختار سازه‌ها ارائه شده است [5]. این الگوریتم‌ها عبارتند از: روش حذف سخت/نرم، روش همگن‌سازی، دیدگاه سازه مبنا و روش حباب. در سه روش آخر باید تابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود را تعریف نمود مسئله‌ی بهینه‌سازی را با استفاده از روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی ترتیبی درجه‌ی دو حل کرد. این سه روش نسبتاً پیچیده‌اند،ولی بر خلاف آن‌ها روش حذف سخت/نرم بر اصول بسیار ساده‌ای استوار است. در این پژوهش نیز از الگوریتم حذف نرم (Soft Kill Option (SKO))استفاده شده است.

روش رشد سازگار بیولوژیکی در بهینه‌سازی شکل

نظریه‌ی این روش بر اساس تغییرات سازه‌های بیولوژیکی در اثر نیروهای مختلف در طبیعت می‌باشد. در این روش نیازی به استفاده از گرادیان‌های تنش و تغییر مکان نیست. حذف محاسبات مربوط به محاسبه‌ی گرادیان باعث می‌شود که سرعت عملیات بهینه‌سازی بسیار زیاد و هزینه‌ی بهینه‌سازی به طور قابل‌توجهی کاهش یابد. دقت این روش بسیار بیش‌تر از سایر روش‌های بهینه‌سازی شکل است، به گونه‌ای

که بعضی از پژوهشگران از نتایج حاصل از روش رشد سازگار بیولوژیکی به عنوان معیاری برای ارزیابی روش‌های دیگر در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند [6-8]. نظریه‌ی بنیادی در روش رشد سازگار بیولوژیکی این است که برای مینیمم سازی تنش‌های ماکزیمم، در محل‌هایی که تنش موضعی زیادی وجود دارد ماده اضافه گردد و در محل‌هایی که تنش موضعی کم‌تر است از مقدار ماده کاسته شود. این عملیات با تغییر موقعیت گره‌ها در مدل المان محدود انجام می‌شود و تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار تنش در مرز مورد مطالعه یکنواخت شود و شرط همگرایی برآورده گردد.

برای بهینه‌سازی به روش فوق، پژوهشگران الگوریتم‌های مختلفی ارائه کرده‌اند[9-11]. الگوریتمی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، الگوریتم پیشنهادی Wu[2] است. عملکرد این الگوریتم که بر پایه‌ی اختلاف تنش‌های ون مایزز بنا گردیده، بدین صورت است که برای به دست آوردن شکل بهینه‌ی یک سوراخ، باید اختلاف تنش‌های ماکزیمم و مینیمم ون مایزز از یک مقدار خاصی کم‌تر باشد. این الگوریتم در بخش بعدی تشریح می‌شود. شکل (۱)نیز فرآیند روش را نشان می‌دهد.

مراحل فرآیند بهینه‌سازی. در این پژوهش الگوریتم پیشنهادی Wu[2]به صورت اصلاح شده‌ی زیر به‌کار گرفته می‌شود:

۱- تعریف پارامترهای طراحی و بهینه‌سازی شامل: نوع المان به‌کار گرفته شده برای تحلیل اجزای محدود، خواص مواد، ابعاد، بارگذاری‌ها، شرایط مرزی، فاکتور مقیاس، تعداد نقاط کنترلی، تعداد تکرار و دقت بهینه‌سازی.

۲- مدل‌سازی اولیه و تحلیل اجزای محدود مدل اولیه: این مرحله با استفاده از نرم‌افزار انسیس(ANSYS) [12]انجام می‌گیرد.

۳- هم گرایی بهینه‌سازی: در این مرحله پارامتر REبه صورت معادله‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$RE = \left|\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}}\right| \qquad (۱)$$

که σ_{max} و σ_{min} به ترتیب تنش‌های ون مایزز ماکزیمم و مینیمم هستند. حال اگر مقدار REاز دقت تعیین شده برای فرایند بهینه‌سازی (τ) کم‌تر باشد، عملیات متوقف می‌گردد، در غیر این صورت وارد چرخه می‌شود.

٤- چرخه : در این مرحله باید مختصات جدید نقاط کنترلی را از معادله‌ی (۲) به دست آورد.

$$X(i) = x(i) + \sigma(i) \times K(j) \qquad (۲)$$

که در آن $X(i)$ و $x(i)$به ترتیب مختصات جدید و قبلی نقطه‌ی iام است. $\sigma(i)$ از معادله‌ی (۳) برای نقطه کنترلی i به دست می‌آید و $K(j)$فاکتور مقیاس در چرخه‌ی jام است و مقدار اولیه‌ی ۰/۰۰۰۱ برای آن در نظر گرفته می‌شود.

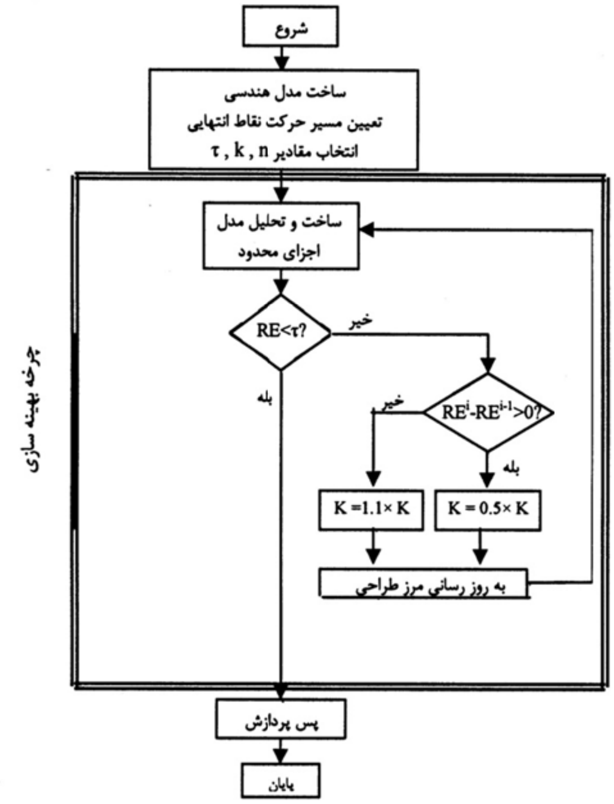
$$\sigma(i) = (\sigma_{Von}(1) - \sigma_{Von}(i))/\sigma_{Von}(1) \qquad (۳)$$

که $\sigma_{Von}(i)$ تنش ون مایزز در نقطه‌ی کنترلی iام است.

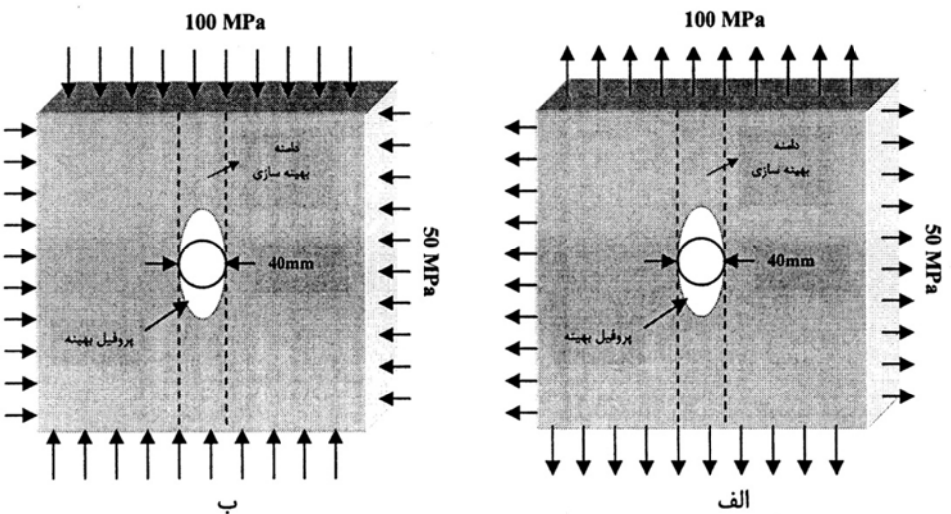
٥- مدل‌سازی مجدد و تحلیل اجزای محدود مدل جدید: در این مرحله سازه بار دیگر با استفاده از نقاط کنترلی جدید مدل‌سازی می‌شود. سپس تحلیل المان محدود انجام می‌گردد.

٦- هم گرایی بهینه‌سازی: در این مرحله اگر RE در چرخه‌ی jام کم‌تر از چرخه‌ی $j-1$ام باشد، فاکتور مقیاس در عدد ۰/۵ و در غیر این صورت در عدد ۱/۱ ضرب می‌شود.

۷- مراحل ۳ تا ٦ تا آن‌جا تکرار می‌شود که مقدار RE از دقت بهینه‌سازی (τ) کم‌تر شود. [2]



شکل ۱ الگوریتم پیشنهادی Wu[2]برای فرایند بهینه‌سازی شکل

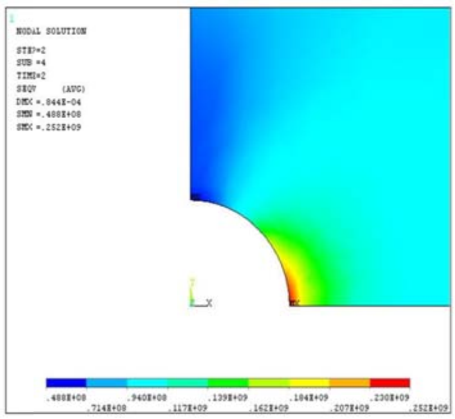


شکل ۲ صفحه دارای سوراخ مرکزی الف) با بارگذاری کششی، ب) با بارگذاری فشاری

کاربرد روش رشد سازگار بیولوژیکی در بهینه‌سازی شکل

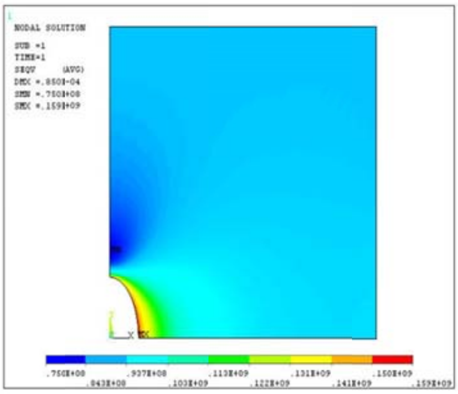
مثال ۱–یک صفحه‌ی مربعی دوبعدی دارای سوراخ مرکزی که از دو طرف تحت بارگذاری نامتقارن قرار گرفته در نظر بگیرید. هدف بهینه‌سازی شکل صفحه به منظور افزایش عمر خستگی آن است (شکل ۲– الف یا ب). طول ضلع مربع، قطر سوراخ و ضخامت صفحه به ترتیب ۴۰۰، ۴۰ و ۴۰میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. هم‌چنین در تمام تحلیل‌ها ماده با مدول الاستیسیته‌ی$210GPa$ و ضریب پواسون۰/۳ فرض شده است. برای اعمال بار تناوبی، ابتدا صفحه‌ی تحت بار کششی در جهت y به میزان ۱۰۰MPa و در جهت x به میزان۵۰MPa شکل (۲– الف) و سپس تحت بار فشاری به همین میزان شکل (۲– ب) قرار می‌گیرد. فرکانس بار نوسانی برابر 1cycle/sدر نظر گرفته می‌شود.

به دلیل تقارن، یک چهارم صفحه در نرم‌افزار ANSYS تحلیل شده است. نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد که در اطراف سوراخ به دلیل تمرکز تنش و توزیع غیریکنواخت آن ترک ناشی از خستگی به سرعت رشد می‌کند و عمر سازه در اطراف سوراخ به شدت کاهش می‌یابد.



شکل۳ توزیع غیریکنواخت تنش در اطراف سوراخ بهینه نشده

فرآیند بهینه‌سازی. بر مبنای الگوریتم بیان شده، با استفاده از زبان طراحی پارامتری انسیس (۵– ANSYS (Parametric Design Language (APDL) کدی نوشته شده که شکل بهینه‌ی سوراخ را مشخص می‌کند. همان‌گونه که در شکل (٤) مشاهده می‌شود، شکل بهینه شبیه یک بیضی است، به گونه‌ای که قطر بزرگ بیضی در امتداد نیروی بزرگ‌تر و قطر کوچک در امتداد نیروی کوچک‌تر است و این با اصل رشد سازگار بیولوژیکی که باید در مقاطع با تنش زیادتر ماده افزوده شود و در مقاطع با تنش کم‌تر از مقدار ماده کاسته شود، کاملاً مطابقت دارد.



شکل٤ توزیع یکنواخت تنش در اطراف سوراخ بهینه

در شکل (۵) برای نمایش واضح‌تر، اطراف سوراخ با بزرگ‌نمایی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های (۵و ٤) دیده می‌شود، توزیع تنش در اطراف سوراخ یکنواخت است و تنش‌ها در محدوده‌ی کوچک‌تری قرار دارند. مقدار تنش ماکزیمم کاهش یافته و تمرکز تنش بسیار کم‌تر است.پارامتر RS به عنوان درصد کاهش تنش در حالت بهینه نسبت به حالت اولیه به صورت معادله‌ی(٤) تعریف می‌شود.

$$RS = [(\sigma_i - \sigma_o)/\sigma_i] \times 100 \qquad (٤)$$

که σ_i و σ_o به ترتیب تنش‌های اولیه (غیر بهینه) و بهینه

می‌باشند. اگر در معادله‌ی (٤) به جای σ_i و σ_o، به ترتیب RE_i و RE_o قرار داده شود درصد افزایش یک‌نواختی تنش به دست می‌آید که در آن RE_i و RE_o از معادله‌ی (۱) به ترتیب برای حالات بهینه نشده و بهینه به دست می‌آیند. در جدول (۱)تنش‌های ون مایزز در دو حالت بهینه نشده و بهینه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش ون مایزز متوسط برای حالت بهینه ۲۲ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین مقدار RS برای RE، 47 درصد به دست می‌آید که نشان می‌دهد تنش در حالت بهینه ٤٧ درصد یک‌نواخت‌تر شده است.

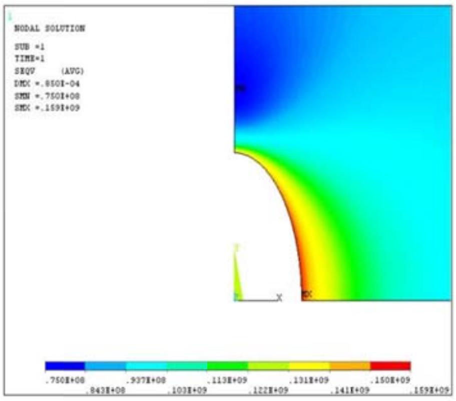
جدول ۱تنش‌های ون مایزز در دو حالت بهینه نشده و بهینه برای صفحه‌ی دارای سوراخ مرکزی

حالت	von-Misses stress (*MPa*)			RE
	Maximum	Minimum	Mean	
بهینه نشده	2.52e2	0.488e2	1.504e2	0.67
بهینه	1.59e2	0.750e2	1.170e2	0.36
RS (%)	37	–	22	47

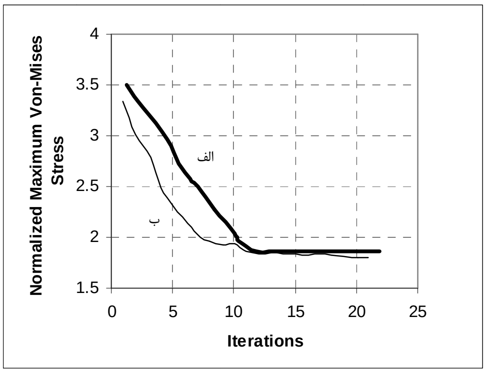
در نمودار شکل (٦) نتایج این پژوهش با نتایج Wu[2]مقایسه شده است. برای محاسبه‌ی تنش‌های ون مایزز ماکزیمم نرمال شده مربوط به هر چرخه از معادله‌ی (۵) استفاده می‌شود.

$$\sigma^j_{max-normal} = (\sigma^j_{max} - \sigma_{ref}) / \sigma_{ref} \quad (۵)$$

که σ^j_{max} و $\sigma^j_{max-normal}$به ترتیب تنش ون مایزز ماکزیمم و نرمال شده در چرخه‌ی j ام و σ_{ref} تنش مرجع است. σ_{ref}را می‌توان تنش ون مایزز صفحه بدون سوراخ در نظر گرفت که برابر ٨٦/٦ *MPa* است. در نمودار شکل (٦) سرعت همگرا شدن الگوریتم به‌کار برده شده مشاهده می‌شود. با مشاهده‌ی نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بعد از ۲۰ چرخه جواب همگرا شده است و این با نتایج Wu[2]کاملاً سازگار است. همان‌گونه که از نمودارها مشخص است،تنش‌های ماکزیمم نرمال شده تقریباً با هم برابرند.



شکل ۵ توزیع یکنواخت تنش در اطراف سوراخ بهینه با بزرگ‌نمایی اطراف سوراخ



شکل ٦ سرعت همگرا شدن الگوریتم به‌کار برده شده برای صفحه‌ی سوراخ دار الف) در این پژوهش، ب) الگوریتم Wu[2]

محاسبه‌ی عمر خستگی.در اثر اعمال بار تناوبی بر روی سازه، با این که تنش ماکزیمم ایجاد شده کم‌تر از تنش نهایی آن است، اما پس از تعدادی سیکل، بر روی سازه ترک‌هایی ایجاد شده که در نهایت منجر به شکست می‌شود. به این پدیده خستگی در اثر اعمال بار تناوبی، و به تعداد سیکل‌هایی که سازه قبل از شکست تحمل می‌کند، عمر خستگی می‌گویند. روش محاسبه‌ی عمر خستگی در نرم‌افزار انسیس بر اساس استاندارد مخازن تحت فشار (Pressure Vessels) است. در این پژوهش هدف بهینه‌سازی شکل صفحه

برای افزایش عمر خستگی آن است. پس از به دست آمدن شکل بهینه‌ی صفحه‌ی دارای سوراخ مرکزی، باید عمر خستگی در اثر بارهای تناوبی کششی و فشاری برای تمامی گره‌های مدل محاسبه گردد. برای محاسبه‌ی عمر خستگی توسط نرم‌افزار انسیس باید گام‌های زیر برداشته شود:

۱- مدل‌سازی و حل مسئله با توجه به بارگذاری موجود در حل خستگی: قبل از انجام هر تحلیل خستگی باید یک تحلیل استاتیکی که شامل حداقل دو بارگذاری است انجام شود؛ که در این پژوهش صفحه‌ی با دو بارگذاری کششی و فشاری تحلیل استاتیکی می‌شود.

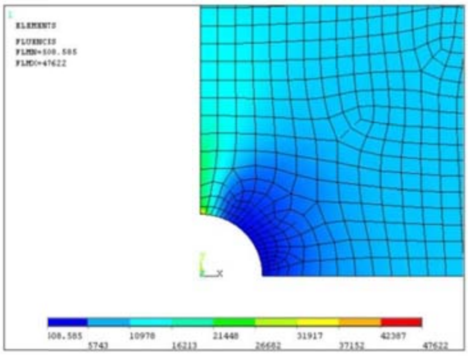
۲- تعیین خواص خستگی ماده‌ی مورد استفاده شامل نمودار تنش_سیکل (Stress_Number of cycles).

۳- تعیین خواص تست کشش- فشار ماده مورد استفاده شامل تنش نهایی (Su)، کاهش سطح (RA)، مدول الاستیسیته (E).

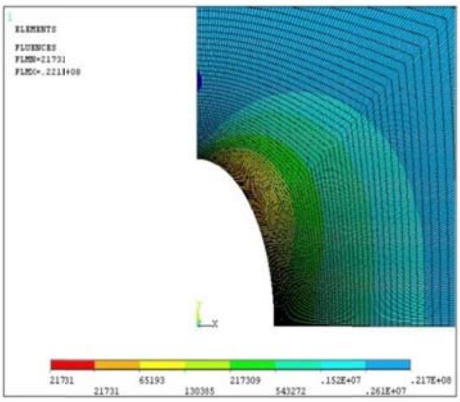
در اینجا نیز با استفاده از APDL کدی نوشته شده تا بتواند عمر خستگی صفحه را به صورت توزیع عمر برای تمامی گره‌های مدل بر روی مدل نمایش دهد. در ابتدا این کد به صفحه‌ی بهینه نشده اعمال می‌شود. نتایج عمر خستگی به صورت شکل (۷) بر روی صفحه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در گوشه‌ی پایین سوراخ عمر صفحه برابر ۵۰۸ سیکل است. بنابراین صفحه پس از ۵۰۸ سیکل کشش و فشار از گوشه‌ی پایین سوراخ ترک برمی‌دارد و شروع به شکست می‌نماید.

حال اگر کد نوشته شده به صفحه با سوراخ بهینه شده اعمال گردد، مشاهده می‌شود که عمر خستگی بسیار افزایش می‌یابد. نتایج عمر خستگی به صورت شکل (۸) بر روی صفحه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، عمر صفحه برابر ۲۱۷۳۱ سیکل است. یعنی در حالت بهینه، صفحه‌ی دیگر از گوشه پایین سوراخ ترک برنمی‌دارد و پس از ۲۱۷۳۱ سیکل کشش و فشار به تدریج از گوشه‌ی بالای سوراخ بیضوی ترک بر می‌دارد.

مقایسه‌ی بین دو حالت نشان می‌دهد که در حالت بهینه‌ی عمر صفحه حداقل ۴۰ برابر افزایش می‌یابد و این در حالی است که هنوز آثار ترک چندان به چشم نمی‌آید. مسئله‌ی مورد بررسی این مقاله (محاسبه‌ی عمر خستگی) و روش بهینه‌سازی استفاده شده، در مراجع دیگر مورد بحث قرار نگرفته است. با این همه، در پژوهش متک و دیگران [13] نیز عمر خستگی سازه‌ها با روش بهینه‌سازی به وسیله‌ی کامپیوتر (Computer-aided optimization (CAO)) تا ۴۰ برابر افزایش یافته است.



شکل ۷ نتایج عمر خستگی برای صفحه‌ی بهینه نشده و کاهش مقدار آن در گوشه‌ی پایین سوراخ

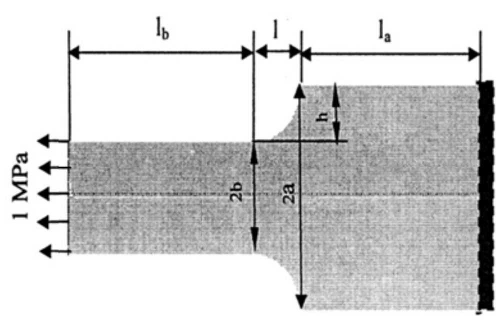


شکل ۸ نتایج عمر خستگی برای صفحه‌ی بهینه و افزایش آن نسبت به حالت بهینه نشده

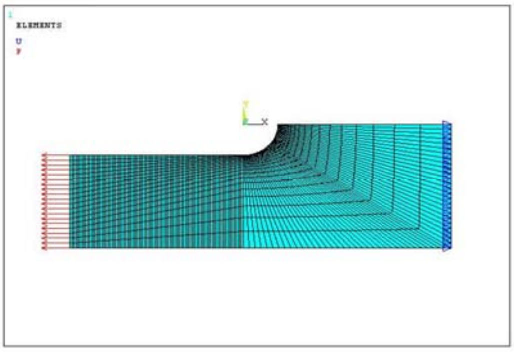
مثال ۲- در این مثال یک فیلت دوبعدی که از یک طرف تحت تنش یکنواخت و از طرف دیگر روی

تکیه‌گاه ساده قرار گرفته است؛ برای یک نواخت سازی توزیع تنش در محل ناچ بررسی می‌شود(شکل۹). این مسئله نیز توسط Wu[2]بررسی شده است. مشخصات سازه عبارت است از: $E = 210\ GPa$ ،$\upsilon = 0.3$، $l_a = l_b = 5l = 5h = 0.5\ m$ ،$a = 0.3\ m$ ،$b = 0.2\ m$ که در آن E مدول الاستیسیته و υ ضریب پواسون است. به علت تقارن تنها نیمی از فیلت با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحلیل شده که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

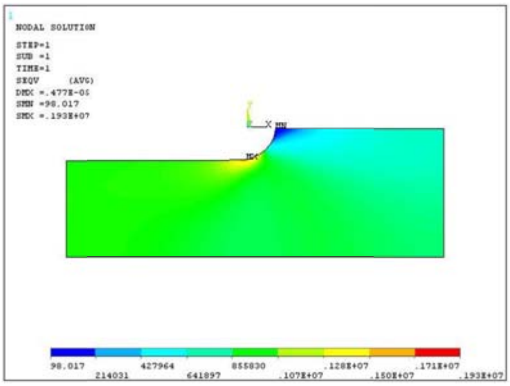
برای اعمال الگوریتم رشد بیولوژیکی با استفاده از *APDL* کدی نوشته شده که شکل بهینه‌ی فیلت را بعد از ۱۲ مرتبه تکرار به دست می‌آورد. توزیع تنش ون مایزز برای حالت‌های بهینه و غیر بهینه در شکل‌های (۱۲و۱۱) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت بهینه شعاع فیلت برای از بین بردن تنش‌های ماکزیمم افزایش یافته است و در نهایت تنش‌ها در بازه‌ی کوچک‌تری توزیع شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار RS برای تنش ون مایزز متوسط، ۳۰ درصد است. در جدول (۲) تنش‌های ون مایزز در حالت‌های بهینه و غیر بهینه مقایسه شده است.



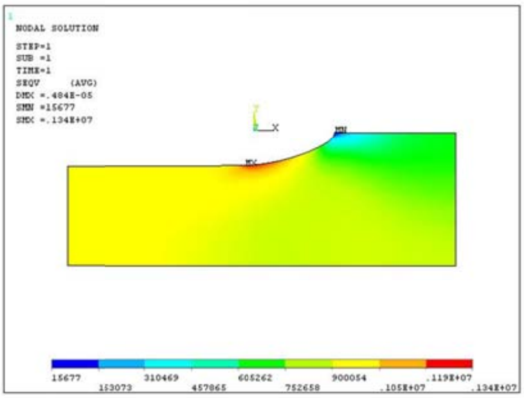
شکل ۹ ابعاد هندسی صفحه‌ی فیلت تحت کشش یک طرفه



شکل ۱۰ مدل اجزای محدود فیلت در نرم‌افزارANSYS



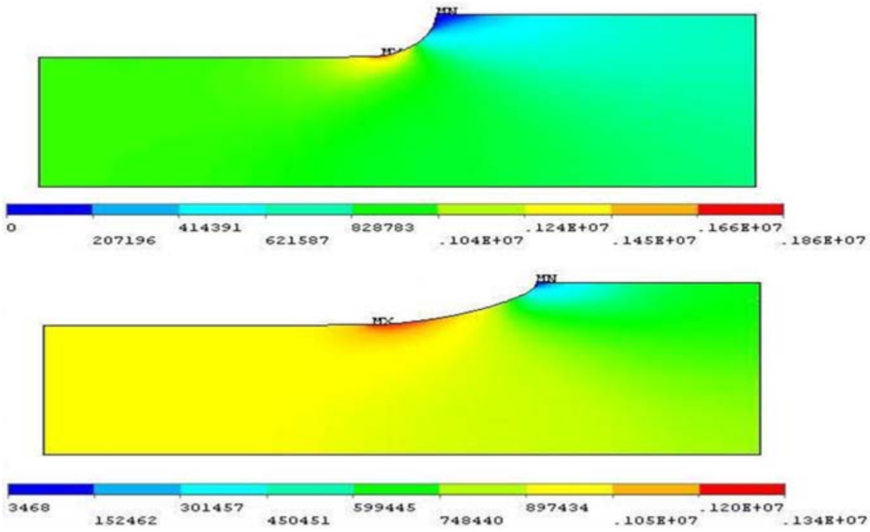
شکل ۱۱ توزیع تنش ون مایزز در حالت غیر بهینه



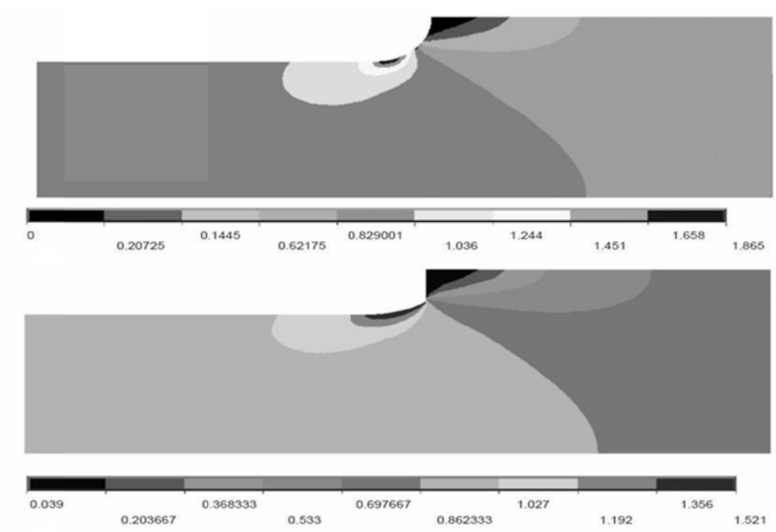
شکل ۱۲ توزیع تنش ون مایزز در حالت بهینه

جدول ۲تنش‌های ون مایزز در دو حالت بهینه نشده و بهینه برای فیلت

RS (%)	von-Misses stress (*MPa*)			حالت
	Mean	Minimum	Maximum	
-	0.96	0.98e-4	1.93	بهینه نشده
30	0.68	1.56e-2	1.34	بهینه



(الف)



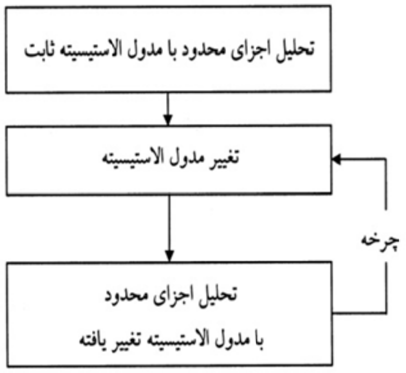
(ب)

شکل ۱۳ توزیع تنش اصلی اول الف) در این پژوهش، ب) مقاله[2]Wu

در شکل (۱۳) توزیع تنش اصلی اول نسبت به نتایج Wu [2]مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این پژوهش بعد از ۱۲ چرخه جواب همگرا می‌شود در حالی که در مقاله‌ی[2]Wu بعد از ۲۷ چرخه همگرایی حاصل شده است شکل (۱٤). هم‌چنین، ماکزیمم تنش اصلی اول نرمال شده در این مقاله ۱/۳٤ است که نسبت به نتایج [2]Wu (۱/۵۲۱) ٦ درصد کم‌تر است.



شکل ۱٤ سرعت همگرا شدن الگوریتم به‌کار برده شده برای فیلت، الف) در این پژوهش، ب) الگوریتم [2]Wu



شکل ۱۵ ساختار الگوریتم حذف نرم

روش رشد سازگار بیولوژیکی در بهینه‌سازی ساختار

در بهینه‌سازی ساختار با استفاده از روش رشد سازگار بیولوژیکی، از این رفتار درختان الهام گرفته می‌شود که در محل‌هایی که بار واردشده بیش‌تر است تنه‌ی درخت سفت‌تر و محکم‌تر است. در بهینه‌سازی یک سازه نیز می‌توان از این رفتار بهره گرفت به گونه‌ای که قسمت‌هایی از سازه که تنش بیش‌تری دارند از مواد با مدول الاستیسیته بالاتر و قسمت‌هایی که تنش کم‌تری دارند از مواد با مدول الاستیسیته کم‌تر انتخاب شوند. یکی از الگوریتم‌هایی که برای بهینه‌سازی ساختار سازه‌ها با استفاده از روش رشد سازگار بیولوژیکی ارائه شده، الگوریتم حذف نرم است. این الگوریتم بر پایه‌ی مدول الاستیسیته المان‌هاست و در هر مرحله مدول الاستیسیته المان‌های جسم را تابع تنش آن المان در مرحله‌ی قبل در نظر می‌گیرد. در نهایت المان‌هایی را که مدول الاستیسیته کم‌تری دارند و یا به عبارتی تنش کم‌تری دارند را حذف و یا بی‌اثر می‌کند و المان‌های با مدول الاستیسیته بالاتر را در ساختار سازه نگه می‌دارد.

ساختار این الگوریتم همان‌گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده به صورت زیر است.

۱- محاسبه‌ی تنش‌های ون مایزز هر المان با در نظر گرفتن شرایط مرزی و بارگذاری و در نظر گرفتن مدول الاستیسیته ثابت برای همه‌ی المان‌ها.

۲- تغییر مدول الاستیسیته المان‌ها با در نظر گرفتن تنش‌های ون مایزز به دست آمده در گام ۱ با استفاده از معادله‌ی (٦).

$$E_{n+1} = E_n + K(\sigma_n - \sigma_{ref}) \qquad (٦)$$

که E_{n+1} و E_n به ترتیب مدول الاستیسیته در مراحل n+1 و n است و σ_n تنش ون مایزز در مرحله‌ی n ام برای هر المان و σ_{ref} تنش مرجع برای تمامی المان‌هاست. K فاکتور مقیاس است که در شروع فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند $\sigma_{ref} / 100$ انتخاب شود و در طی فرآیند افزایش یابد.

۳- تحلیل سازه با المان‌هایی که مدول الاستیسیته آن‌ها تغییریافته است و محاسبه‌ی توزیع تنش.

٤- تکرار مراحل ۲ و ۳ و حذف المان‌های با مدول الاستیسیته‌ی کم و در نهایت به دست آوردن ساختاری بهینه[14].

مزیت اصلی روش حذف نرم این است که طراحی بهینه‌ی سازه‌ها تنها با استفاده از یک مدل اجزای محدود و بدون نیاز به تولید مدل جدید و یا مش‌بندی جدید به دست می‌آید. افزون بر این،عامل تعیین‌کننده در ساختار بهینه،تنش مرجع است و افزایش سیکل‌ها، که معمولاً هزینه‌ی قابل توجهی به طراح تحمیل می‌کند و تغییر چندانی در ساختار بهینه ایجاد نمی‌کند.

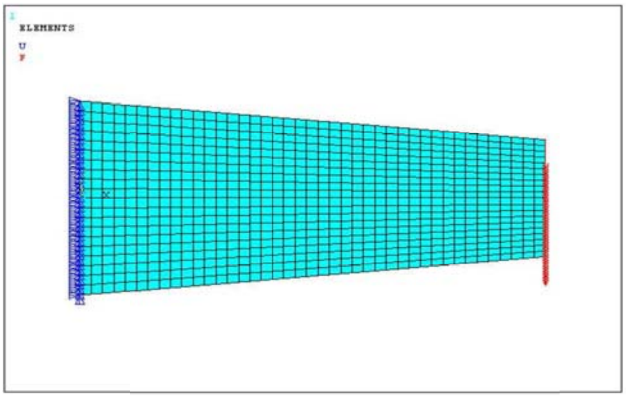
کاربرد روش رشد سازگار بیولوژیکی در بهینه‌سازی ساختار

مثال ۱. در این مثال یک تیر یک‌سر گیردار مخروطی تحت بار عرضی در نظر گرفته شده است. در این مثال نیز از نرم‌افزار ANSYS برای تحلیل و پیاده‌سازی الگوریتم استفاده شده است. مدل اجزای محدود و شرایط مرزی و بارگذاری در شکل (١٦) نشان داده شده است. ساختار بهینه‌ی تیر با دو تنش مرجع ۱/۲MPa و ۳MPa به دست می‌آید. همان‌گونه که

در شکل (۱۷) دیده می‌شود، ساختارهای بهینه‌ی به دست آمده با تنش‌های مرجع مختلف، تفاوت چشم‌گیری دارند که نقش تعیین‌کننده‌ی تنش مرجع را نشان می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش تنش مرجع، مقدار بیش‌تری از ماده حذف می‌شود و با کاهش آن حجم نهایی تیر افزایش می‌یابد.

با مقایسه‌ی نتایج این پژوهش و نتایج Seo و همکاران[15] شکل (۱۸) مشخص می‌گردد که ساختار بهینه برای تیر مخروطی با تنش مرجع کم از نظر شکل مشابه ساختار به دست آمده توسط Seo و همکاران است که با تغییرات ساختاری در فضای پارامتری و فیزیکی تیر مستطیلی به دست آمده است شکل (۱۸- ج). با این تفاوت که حجم نرمال که عبارتست از نسبت حجم نهایی به حجم اولیه، برای سازه‌ی این پژوهش ۰/٦۷و برای سازه‌یSeo و همکاران ۰/٦ است شکل (۱۸- ب). از طرف دیگر ساختار بهینه برای تیر مخروطی با تنش مرجع بالاتر مشابه ساختار Seo و همکاران است که با بهینه‌سازی شکل تیر مستطیلی به دست آمده است شکل (۱۸- د). با این مزیت که حجم نرمال سازه‌ی این پژوهش در این حالت ۰/۳۸ و حجم نرمال ساختار Seo و همکاران ۰/٦است.

مثال ۲. در این مثال یک تیر با سطح مقطع متفاوت در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۹) مدل اجزای محدود و شرایط مرزی و بارگذاری نشان داده شده است. با اعمال الگوریتم حذف نرم ساختار بهینه به دست می‌آید. همان‌گونه که در شکل (۲۰) دیده می‌شود، در این‌جا نیز تنش مرجع نقش تعیین کننده‌ای در ساختار بهینه دارد. در ضمن حجم نرمال برای تیر با سطح مقطع متفاوت با تنش مرجع کم ۰/۵ و با تنش مرجع زیاد ۰/۲ است و این نتایج بسیار به‌تر از مثال قبلی و نتایج Seo و همکاران است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که در حالت تنش مرجع بالا با شرط یکسان بودن شرایط مرزی و بارگذاری، ساختار بهینه‌ی تیرهای با شکل اولیه‌ی متفاوت، یکسان خواهند بود.

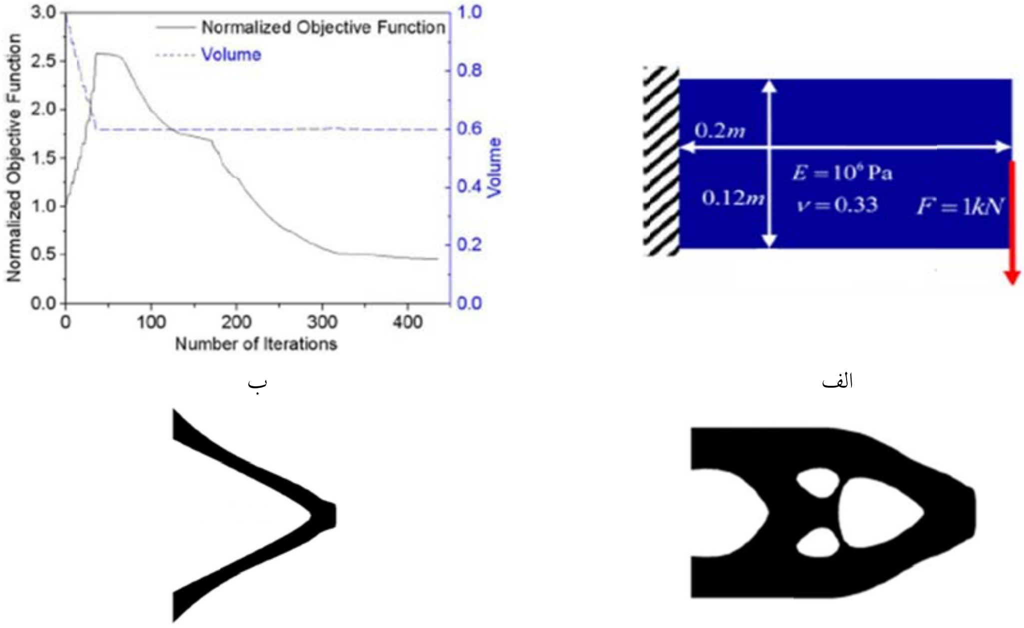


شکل ١٦ مدل اجزای محدود تیر مخروطی تحت بار عرضی



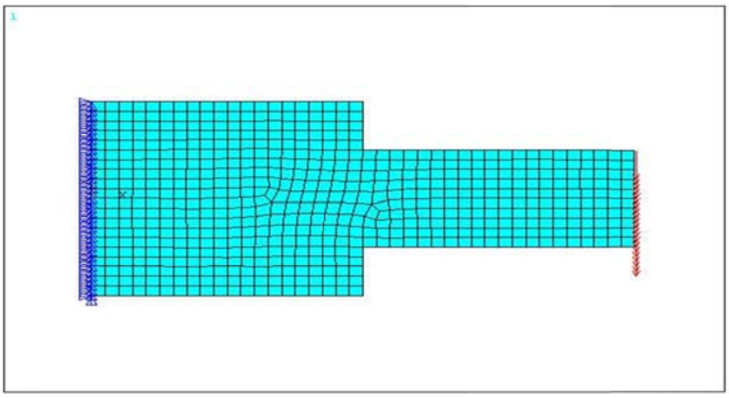
الف ب

شکل ۱۷ ساختار بهینه برای تیر مخروطی تحت بار عرضی، الف) با تنش مرجع $1/2MPa$، ب) با تنش مرجع $3MPa$

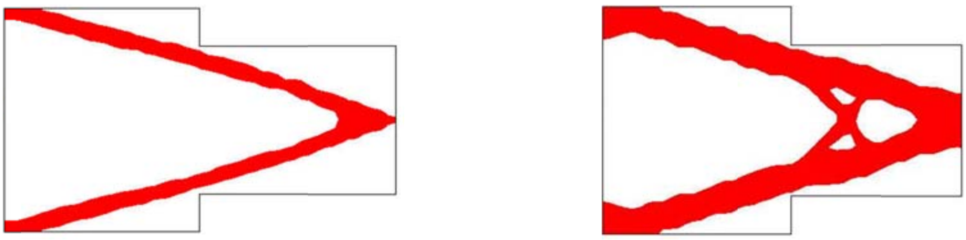


ج د

شکل ۱۸ برگرفته از[15] الف) تیر یک سر گیردار مستطیلی، ب) تغییرات تابع هدف و قید حجم،
ج) تغییرات ساختاری در فضای فیزیکی و پارامتری مسئله، د) پروفیل بهینه



شکل ۱۹ مدل اجزای محدود تیر با سطح مقطع متفاوت تحت بار عرضی



الف ب

شکل ۲۰ ساختار بهینه برای تیر با سطح مقطع متفاوت تحت بار عرضی الف) با تنش مرجع $1/2MPa$ ب) با تنش مرجع $3MPa$

نتیجه‌گیری

در این مقاله هـدف بـه دسـت آوردن شـکل و سـاختار بهینه‌ی سازه‌های مکانیکی به منظور یـک‌نـواختی تـنش، کاهش تنش‌های ماکزیمم و یا کـاهش حجـم اسـت. بـا استفاده از اصل رشد سازگار بیولوژیکی، الگوریتمی ارائه شده است که شکل بهینه‌ی سوراخ و فیلت را به دسـت می‌آورد.در صـفحه‌ی سـوراخ دار، سـوراخ دایـره‌ای در شکل بهینه به صورت بیضی با قطر بزرگ‌تـر در جهـت بار بیش‌تر تغییر یافته است. هم‌چنین، تـنش متوسـط در حالت بهینه ۲۲ درصـد کـاهش مـی‌یابـد. سـپس بـرای محاسبه‌ی عمر خستگی سازه، با استفاده از APDLکـدی نوشته شده است تا عمر خستگی به صورت کـانتور بـر روی مدل نمایش داده شـود. عمـر خسـتگی در حالـت بهینه تا ٤٠ برابر افزایش می‌یابد. در مورد فیلت نیز تنش متوسط در حالت بهینه ۳۰ درصـد کـاهش یافتـه اسـت. هم‌چنین ماکزیمم تنش اصـلی اول نرمـال شـده در ایـن پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی ٦ درصد کم‌تر شده که نشان‌دهنده‌ی مزیت روش پیشنهادی است.

افزون بر این، الگوریتم حذف نرم برای بهینه‌سـازی ساختار تیر مخروطی و تیر با سطح مقطع متفاوت اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب تنش مرجع بالاتر، ساختار بهینه بـرای تیرهـای بـا شـرایط مـرزی و بارگذاری یکسان، مشابه خواهد بود. اعمال این الگوریتم منجر به کاهش حجم نرمال و به دنبـال آن کـاهش وزن سازه نسبت به موارد مشابه پیشین شده است.

فهرست نمادها و نشانه‌ها

E مدول الاستیسیته

E_n مدول الاستیسیته مرحله‌ی nام

E_{n+1} مدول الاستیسیته مرحله‌ی n+1ام

K فاکتور مقیاس

$K(j)$ فاکتور مقیاس در چرخه‌ی jام

RA کاهش سطح

RE همگرایی بهینه‌سازی

RS درصد کاهش تنش

Su تنش نهایی

$X(i)$ مختصات جدید نقطه iام

$x(i)$ مختصات قبلی نقطه iام

نمادهای یونانی

$\sigma(i)$ تنش نقطه iام

$\sigma_{Von}(i)$ تنش ون مایزز نقطه iام

σ_n تنش ون مایزز مرحله‌ی nام

σ_{max} تنش ون مایزز ماکزیمم

σ_{min} تنش ون مایزز مینیمم

σ^j_{max} تنش ون مایزز ماکزیمم در چرخه‌ی jام

$\sigma^j_{max-normal}$ تنش ون مایزز ماکزیمم نرمال در چرخه‌ی jام

σ_i تنش اولیه (غیر بهینه)

σ_o تنش بهینه

σ_{ref} تنش مرجع

υ ضریب پواسون

τ دقت بهینه‌سازی

مراجع

1. Fleury, C., "Reconciliation of mathematical programming and optimality criteria approaches to structural optimization.", in: Morris AJ (ed) Foundations of structural optimization: a unified approach. Wiley, Chichester, pp. 363–404, (1982).
2. Wu, Z., "An efficient approach for shape optimization of components", *International Journal of*

Mechanical Sciences, Vol. 47, pp. 1595–1610, (2005).

3. Rozvany, G.I.N.,"A critical review of established methods of structural topology optimization" *Struct Multidisc Optim*, Vol. 37, pp. 217–237, (2009).
4. Fanni, M., Schnack, E. and Granwald, J., "Shape optimization of dynamically loaded machine parts", *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 59, pp. 281-297, (1994).
5. Querin, O.M., "Evolutionary structural optimization: stress based formulation & implementation", PhD Dissertation, department of Aeronautical engineering, university of Sydney, Australia, (1997).
6. Mattheck, C. and Tesari, I., "The mechanical self-optimization of trees", *Design and Nature II*, pp. 197-206, (2003).
7. Das, R. and Jones, R., "Development of a 3D biological method for fatigue life based optimisation and its application to structural shape design", *International Journal ofFatigue*, Vol. 31, no. 2, pp. 309–321, (2009).
8. Tekkaya, A. and Gűneri, A., "Shape optimization with the biological growth method: a parameter study",*Engineering Computations*, Vol. 13, No. 8, pp. 4–18, (1996).
9. Ledermann, M., Tesari, I. and Mattheck, C., "CAO-shape optimization of a fillet with a complex, time dependent loading", *International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures*, OPTI, Bologna, Proceedings 7, pp. 203-210, (2001).
10. Mattheck, C., "Teacher tree: The evolution of notch shape optimization from complex to simple", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 73, no.12, pp. 1732-1742, (2006).
11. Peng, D. and Jones, R., "An approach based on biological algorithm for three-dimensional shape optimization with fracture strength constrains",Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, Vol. 197, pp. 4383–4398, (2008).
12. ANSYS(R), SAS IP, Inc. Released 10.0 UP 20050718
13. Mattheck, C., Erb, D., Bethge, K. and Begemann, U., "Three-dimensional shapeoptimization of a bar with arectangular hole",Fatigue Fract Eng Mater. Struct, 15, pp. 347–351, (1992).
14. Baumgartner, A., Harzheim L. and Mattheck, C., "SKO (Soft Kill Option): thebiological way to find an optimum structure topology", *International Journal of Fatigue*, Vol. 14, pp. 387–393, (1992).
15. Seo, Y.D., Kim, H.J. and Youn, S.K., "Shape optimization and its extension to topological design based on isogeometric analysis", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47,11-12, pp. 1618–1640, (2010).